

## 〈特集〉

# 廃棄物焼却炉等，都市静脈系施設からの微小粒子状物質排出傾向

塩田 憲司<sup>1)</sup>，大下 和徹<sup>2)</sup>，藤森 崇<sup>3)</sup>，高岡 昌輝<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 京都大学大学院工学研究科  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: shiota@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

<sup>2)</sup> 京都大学地球環境学堂  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

<sup>3)</sup> 京都大学地球環境学堂  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: fujimori@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

<sup>4)</sup> 京都大学地球環境学堂  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: takaoka@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

## 概要

本稿では、固定発生源のなかでも実稼動中の廃棄物焼却などの都市静脈系施設を中心に、PM<sub>2.5</sub> 排出傾向の現状を紹介する。長期的な微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) への対策として、燃焼などの高温プロセスを有する人為起源への取り組みが有効と考えられる。しかし近年、国内において固定発生源からのPM<sub>2.5</sub> 排出の実測による知見は少ない。廃棄物焼却施設として、都市ごみ焼却施設、都市ごみ熔融施設、および下水汚泥焼却施設、その他の施設として火葬場等それぞれの1次粒子排出傾向を紹介し、今後の課題として、2次生成粒子を含む取り組みなどを取り上げる。

キーワード：微小粒子状物質，PM<sub>2.5</sub>，固定発生源，廃棄物焼却，排出

原稿受付 2014.11.27

EICA: 19(4) 49-53

## 1. はじめに

微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) に代表される粒子状物質 (PM) の大気汚染は、大気の流れにより移動し発生源の周囲などの局所的な範囲にとどまらないため、制御が容易ではない。そのため、発生源への適切な対策が必要であるが、自然発生源の制御は困難であり、特に人為発生源からの排出を抑制していくことが望まれる。人為発生源の排ガス中には、既に粒子の状態である一次粒子だけでなく、二次粒子の生成源となる硫酸化物 (SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) も含まれることから、排出実態の把握およびその抑制に対する取り組みが重要である。しかし、非常に多くの観測点でモニタリングされている大気中PM<sub>2.5</sub>や、ディーゼル車に代表される移動発生源に比べ、固定発生源については排出実態の把握は十分には進んでいないのが現状である。

固定発生源のなかでも、大気汚染防止法などで定められるばい煙発生施設については、PM<sub>2.5</sub> の特に主要な発生源と推測される。これらの施設から排出されるばい煙のうち、PM<sub>2.5</sub> に関連していると考えられるSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、およびばいじんについては、一部の小規模施設のSO<sub>x</sub> 以外は常時あるいは定期的な濃度測定が大気汚染防止法により義務付けられている。ま

た、環境省により3年毎にアンケート集計による同法などで定められるばい煙発生施設からの排出量調査が行われており、PM<sub>2.5</sub> の排出実態を知る上でのひとつの参考になると考えられる。平成25年度公表された平成23年度実績においては、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、およびばいじんの総排出量が、それぞれ410,979トンまたは143,843 kNm<sup>3</sup>、696,404トンまたは339,118 kNm<sup>3</sup>、36,529トンと見積もられている<sup>1)</sup>。しかし、固定発生源から排出される排ガス中のPM<sub>2.5</sub> の測定法が確立したのは最近のことでもあり<sup>2-5)</sup>、国内においてはばい煙発生施設におけるPM<sub>2.5</sub> 排出濃度の測定は現在のところ義務付けられてはいない点や、施設の排ガス処理高度化による排出ばいじん量低下などもPM<sub>2.5</sub> の排出実態把握が進んでいなかった要因のひとつと考えられる。

本稿では、国内の固定発生源、特に廃棄物焼却施設 (都市ごみ焼却施設、都市ごみ熔融施設、下水汚泥焼却施設) のような都市静脈系施設からの排出傾向を中心にPM<sub>2.5</sub> 排出実態の現状を紹介する。

## 2. 発生源 PM<sub>2.5</sub> 測定方法

### 2.1 一次粒子

本稿で紹介する固定発生源から排出される一次粒子

としてのPM2.5濃度は、3つの異なる方法により測定されている。詳細はそれぞれの文献を参照いただくとして、ここでは、それぞれの方法について簡単に紹介する。

### (1) 8段分級アンダーセンススタックサンプラー

筆者らの調査で主に用いている方法である<sup>6-11)</sup>。排ガス中粒子のサンプリングは、施設の煙突入口または煙突の測定口において、煙道中8段分級のアンダーセンススタックサンプラーを用いJIS K0302<sup>12)</sup>に準じ行う。各段の分級粒子質量のふるい下累積率を求め、各分級板の分離径でプロットする。それらの点を結ぶ近次曲線が2.5 $\mu\text{m}$ を通過する点におけるふるい下累積率が総粒子質量に占めるPM2.5質量割合とし、PM2.5量を見積もる。これは和田らがバーチャルインパクトなどの分級性能を比較した際に用いたモデル粒子中PM2.5質量割合を見積もった方法と同様である<sup>13)</sup>。PM2.5質量割合の解析例をFig. 1に示す。この場合、捕集粒子の約34%がPM2.5と見積もられる。

### (2) 少段数分級アンダーセンススタックサンプラー

東京都は、平成20年8月～22年2月の期間に様々な発生源からのPM2.5排出実態を調査しており、その中で用いられた方法である<sup>14)</sup>。固定発生源としてはボイラー4施設、廃棄物焼却4施設（都市ごみ焼却2施設、下水汚泥焼却2施設）などで行われている。各施設排ガス最終排出口付近の測定口または最終排出口においてサンプリングし、アンダーセンススタックサンプラーのバックアップフィルターにPM2.5が捕集されるよう、吸引速度を調整するとともに、分級板を選択使用している。

### (3) バーチャルインパクト

神谷らの調査で用いられた方法である<sup>15,16)</sup>。粗粒子と微粒子は捕集ノズルにより分離された後捕集されるので、捕集粒子の再飛散による微粒子への粗粒子混入がなく、正確な微粒子量の計測が可能である。ISO 13271<sup>3)</sup>および国内もJIS Z7152<sup>4)</sup>による標準化がなさ

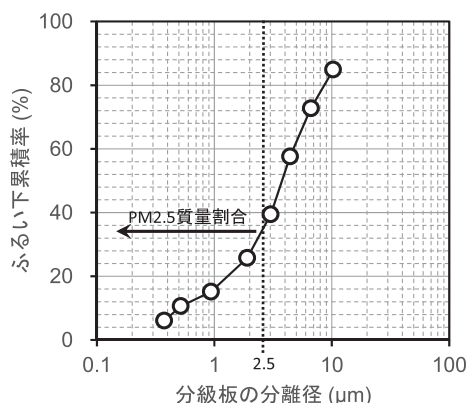


Fig. 1 Example of Mass of PM2.5 in dust by 8-stage Andersen's Stack Sampler

れたが、この方法による固定発生源から排出されるPM2.5濃度データの報告はまだまだ少ない。中国の石炭燃焼施設の集塵装置後排ガス煙道中でのサンプリング例などがある。ばいじんは、バーチャルインパクト内の捕集ノズルによりPM10およびPM2.5に分離され、それぞれ捕集される。

## 2.2 凝縮による二次生成を含む粒子

東京都の調査<sup>14)</sup>で、凝縮性ダストとして報告されているもののサンプリング方法で、PM2.5粒子および空気希釈による二次生成粒子を捕集することで求める。煙道内でPM2.5分級サイクロンによる分級後、希釈装置と滞留用チャンバーを経て凝縮性粒子を含めて捕集する。ISO25597<sup>5)</sup>として標準化される以前のサンプリングであるが、それに準じた分級サイクロン、希釈率、および滞留率で行われている。

## 3. 固定発生源からのPM2.5排出実態

現在までに報告例のある固定発生源からのPM2.5排出実態をTable 1にまとめた。2項で述べたように3つの方法が用いられているため、異なるもの同士の単純比較はできないが、今回はそのまま紹介させていただくことにする。また、PM2.5濃度は、標準状態（温度0 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力101.3 kPa）の乾き排ガス1 $\text{m}^3$ あたりの濃度を記しているが、参考文献中に排ガス中酸素濃度による補正の記述がある場合には印を記した（Table 1：No. 33～35）。

### 3.1 廃棄物焼却施設

ばい煙発生施設のうち、廃棄物焼却施設は平成23年度実績でSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、およびばいじんの総排出量がいずれも施設種別第5位であり、PM2.5排出源のひとつと考えられる。また、微量ではあるが、鉛、亜鉛、カドミウムなどの重金属元素排出源のひとつとも考えられている。これらの元素は粒径の小さい焼却飛灰に相対的に多く含まれることが従前より知られていることから<sup>18)</sup>、廃棄物焼却施設から排出される微小粒子の実態把握はPM2.5だけでなく、その構成成分についても重要と考えられる。

#### (1) 都市ごみ焼却施設

延べ20施設（Table 1：No. 1～20）において、 $<0.6\sim 24200\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ と報告されている。集塵機としてバグフィルター（BF）が導入されている14施設では、一次粒子では $290\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 以下であり、一部の施設では大気環境基準値レベルの濃度である。ただしNo. 19, 20の結果からは、凝縮性粒子を考慮するとその値が大きくなることが示唆される。また、特に高濃度であるNo. 13～18はダイオキシン類対策前の施設

Table 1 Emission of PM2.5 from some Stationary Sources

No.	対象施設	原燃料など	炉	排ガス処理	PM2.5 濃度 ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ )	PM2.5 含む 凝集性粒子 ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ )	採取方法	文献
1	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	0.61		2.1 (1)	7)
2	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	1.7		2.1 (1)	7)
3	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	1.1		2.1 (1)	7)
4	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	<0.6		2.1 (1)	7)
5	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	10		2.1 (1)	7)
6	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	104		2.1 (1)	7)
7	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	5.4		2.1 (1)	6)
8	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	290		2.1 (1)	6)
9	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	18		2.1 (1)	6)
10	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	150		2.1 (1)	6)
11	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	3.8		2.1 (1)	7)
12	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF	60		2.1 (1)	7)
13	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP+WS	840		2.1 (1)	6), 17)
14	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP+WS	5460		2.1 (1)	6), 17)
15	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP	19700		2.1 (1)	6), 17)
16	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP	11340		2.1 (1)	6), 17)
17	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP	18300		2.1 (1)	6), 17)
18	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	EP	24200		2.1 (1)	6), 17)
19	廃棄物焼却	都市ごみ	ストーカ	BF+WS+SCR	120	140	2.1 (2), 2.2	14)
20	廃棄物焼却	都市ごみ	流動床	BF+WS+SCR	94	440	2.1 (2), 2.2	14)
21	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	EP+WS	4800		2.1 (1)	8)
22	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	EP+WS	2200		2.1 (1)	8)
23	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	EP+WEP	72		2.1 (1)	8)
24	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	BF+WS	<0.14		2.1 (1)	8)
25	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	CF+WS	42		2.1 (1)	8)
26	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	CF+WS	57	94	2.1 (2), 2.2	14)
27	廃棄物焼却	下水汚泥	流動床	EP+WS	31	330	2.1 (2), 2.2	14)
28	廃棄物焼却	都市ごみ溶融	シャフト	BF+SCR	9.56		2.1 (1)	9)
29	廃棄物焼却	都市ごみ溶融	シャフト	BF+WS+SCR	287		2.1 (1)	9)
30	廃棄物焼却	都市ごみ溶融	シャフト	BF+WS+SCR	296		2.1 (1)	9)
31	廃棄物焼却	都市ごみ溶融	流動床	BF+WS+SCR+BF	<0.0971		2.1 (1)	9)
32	廃棄物焼却	廃棄物溶融	キュボラ	BF	197		2.1 (1)	9)
33	火葬			BF+SCR	670 <sup>a)</sup>		2.1 (1)	11)
34	火葬			簡易フィルタ	44500 <sup>a)</sup>		2.1 (1)	10)
35	火葬			簡易フィルタ	72200 <sup>a)</sup>		2.1 (1)	10)
36	石炭燃焼	石炭		EP+BF	2000		2.1 (3)	15)
37	石炭燃焼	石炭		EP+BF	5000		2.1 (3)	15)
38	石炭燃焼	石炭		EP+BF	18000		2.1 (3)	15)
39	石炭燃焼	石炭		EP+BF	32000		2.1 (3)	15)
40	石炭燃焼	石炭		EP+BF	47000		2.1 (3)	15)
41	ボイラ	都市ガス		EGR	87	300	2.1 (2), 2.2	14)
42	ボイラ	都市ガス			26	73	2.1 (2), 2.2	14)
43	ボイラ	重油			1000	1100	2.1 (2), 2.2	14)
44	ボイラ	重油		EP+SCR	120	150	2.1 (2), 2.2	14)
45	ボイラ	木くず		サイクロン	6400	17000	2.1 (2), 2.2	14)
46	窯業炉	ガラスくず		脱硫 + サイクロン	43000	45000	2.1 (2), 2.2	14)

BF: バグフィルター, EP: 電気集塵機, WEP: 湿式電気集塵機, CF: セラミックフィルター,  
WS: 湿式ガス洗浄, SCR: 触媒脱硝, EGR: 排ガス誘引機, <sup>a)</sup>: O<sub>2</sub>12% 換算値

での値である。ばいじんについては貴田ら<sup>19)</sup>、東京都<sup>14)</sup>でもダイオキシン類対策により排出が抑制されたことが示されているが、PM2.5についてもダイオキシン類対策によるBF導入など排ガス処理の機能強化により排出が抑制されており<sup>6,7)</sup>、排出源対策として有効であると考えられる。

## (2) 都市ごみ溶融施設

延べ5施設 (Table 1: No. 28~32) において <0.0971~296  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と報告されている。基本的には都市ごみ焼却施設と同じレベルと考えられる。

## (3) 下水汚泥焼却施設

延べ7施設 (Table 1: No. 21~27) において



<0.14~4800  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と報告されている。基本的に、電気集塵機 (EP) では高濃度、湿式 EP、セラミックフィルター、BF の順に低濃度となる傾向である。ただし、凝縮性粒子は No. 28 では一次粒子の約 11 倍の濃度となっており、二次生成が非常に多くなる施設も在り得ることが示唆される。

### 3.2 その他の施設

#### (1) ボイラ、窯業炉

大気汚染防止法で指定されるばい煙発生施設として、ボイラおよび窯業炉についての報告を記す。ボイラは延べ 5 施設 (Table 1: No. 41~45) において一次粒子として 26~6400  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、凝縮性粒子として 73~17000  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と報告されている。排ガス処理にもよるが、燃料により排出傾向が異なり、都市ガス<重油<木くずで濃度が高くなっている。ガラスくずを扱う窯業炉 (Table 1: No. 46) では、一次粒子として 43000  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 、凝縮性粒子として 45000  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と、あまり凝縮性粒子の影響が少ないことが報告されている。

#### (2) 石炭燃焼

5 回の測定 (Table 1: No. 36~40) で、約 2000~47000  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と報告されている。しかし、バーチャルインパクトの性能評価のため、EP 停止、BF も一部不使用とばいじんを高濃度にした結果であり、通常の排出傾向とは異なると考えられるため、参考値である。

#### (3) 火 葬

延べ 3 施設 (Table 1: No. 33~35) において、 $\text{O}_2$ 12% 換算値で 670~72200  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  と報告されている。これらは換算前に戻すと 119~35300  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  となる。火葬炉は宗教上の観点から排ガスについて各法令の規制は受けてはいないが、煙突高さも低いため、適切な排ガス処理が行われない場合は、非常に高濃度の PM2.5 が排出されうると考えられ、他の有害物質も含めた対策も検討すべきである<sup>10,11)</sup>。

## 4. ま と め

固定発生源から排出される PM2.5 について、都市静脈系施設を中心に国内における現状を紹介した。それらの PM2.5 濃度は、秤量の定量下限レベルから数万  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  まで施設種別や排ガス処理により様々であるが、高度な排ガス処理設備を有する施設では、一次粒子としては大気環境基準レベルという極めて低濃度なケースもあった。データの多くは ISO や JIS の固定発生源「PM2.5」濃度測定法とは測定方法が異なるものの、もともと国内固定発生源からの PM2.5 排出に関する報告が少ないので貴重なデータといえる。

国際標準化されたのが最近のことであり、今後は標準法による幅広い施設種の実稼動固定発生源調査を行うことにより、先ずは一次粒子としての PM2.5 排出実態のデータを多く収集することが必要と考えられる。二次生成粒子については、2014 年 8 月に環境省が二次生成粒子の挙動解明に関する文献調査を報告している<sup>20)</sup>。固定発生源からの二次粒子生成に関する知見は多くはないが、ISO 規定では実際の大気への放出よりはかなり低い希釈率であるため評価には注意が必要としている。しかし、固定発生源からの PM2.5 排出を総合的に評価するためには一次粒子だけでなく二次生成粒子は重要であるため、今後の展開が期待される。

## 謝 辞

このような執筆の機会を与えていただき感謝申し上げます。筆者らの研究につきましては、調査にご協力いただいた自治体、施設の関係各位に感謝いたします。サンプリングや分析は、島津テクノリサーチ株式会社、および当時京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻に在学中であった今井玄哉氏、山口修史氏、辻本悠真氏の 3 名には多大なる労力を頂きました。ここに記し感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 環境省：大気汚染物質排出量総合調査，<http://www.env.go.jp/air/osen/kotei/index.html> (2014. 1001 情報取得)
- 2) ISO 23210: Stationary Source Emissions-Determination of PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> Mass Concentration in Flue Gas-Measurement at Low Concentrations by Use of Impactors (2009)
- 3) ISO 13271: Stationary Source Emissions-Determination of PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> Mass Concentration in Flue Gas-Measurement at Higher Concentrations by Use of Virtual Impactors (2012)
- 4) 日本工業規格：JIS Z7152 バーチャルインパクトによる排ガス中の PM10/PM2.5 の重量濃度測定方法 (2013)
- 5) ISO 25597: Stationary Source Emissions-Test Method for Determining PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Mass in Stack Gases Using Cyclone Samplers and Sample Dilution (2013)
- 6) 塩田憲司，今井玄哉，高岡昌輝，木本 成，松井康人，大下和徹，水野忠雄，森澤真輔：都市ごみ焼却施設から排出される微小粒子へのダイオキシン類除去対策強化による効果，大気環境学会誌，Vol. 46, No. 4, pp. 224-232 (2012)
- 7) M. Takaoka, K. Shiota, G. Imai and K. Oshita: Emission of Particulate Matter 2.5 (PM2.5) from Municipal Solid Waste Incinerators, 7th i-CIPEC (2012)
- 8) M. Takaoka, K. Shiota, S. Yamaguchi and K. Oshita: Emission of Particulate Matter 2.5 (PM2.5) from Sewage Sludge Incinerators, 4th ECSM (2014)
- 9) 辻本悠真：都市静脈系施設からの PM<sub>2.5</sub> および有害金属の排出挙動，京都大学大学院工学研究科修士論文 (2014)
- 10) 大下和徹，高岡昌輝，江口正司，塩田憲司：火葬炉からの酸性ガス，水銀および微小粒子の排出挙動，環境システム計測制御学会誌，Vol. 17, No. 2, pp. 116-125 (2013)

- 11) 大下和徹, 高岡昌輝, 江口正司, 塩田憲司: 火葬炉からの酸性ガス, 水銀および微小粒子の排出挙動 (第2報), 環境システム計測制御学会誌, Vol. 18, No. 2・3, pp. 32-41 (2013)
- 12) 日本工業規格: JIS K0302 排ガス中のダスト粒径分布の測定方法 (1989)
- 13) 和田匡史, 塚田まゆみ, 近藤 光, 小暮信之, W. Lenggoro, W. W. Szymanski, 内藤牧男, 金岡千嘉男, 神谷秀博: 固定発生源煙道内 PM<sub>10</sub>/P<sub>2.5</sub> 質量濃度測定用 multi-stage VIS impactor の分級特性, 粉体工学会誌, Vol. 46, No. 6, pp. 467-475 (2009)
- 14) 東京都: 微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) 等発生源調査結果報告書 (2011)  
[https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/02\\_hassei.pdf](https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/02_hassei.pdf) (2014. 1001 情報取得)
- 15) H. Kamiya, K. Hada, T. Sekizawa, M. Yamada, M. Tsukada, W. Lenggoro, M. Wada, N. Kogure, Y. Tuping and W. W. Szymanski: Measurement and Analysis of Fine Particulate Matters (PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>) and Condensable Nanoparticles Emission from Stationary Sources, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 154, "Sustainable Chemistry", G. Reniers and C. A. Brebbia (Eds.), pp. 71-81, WIT Press (2011)
- 16) 神谷秀博, 並木則和, 塚田まゆみ, Wuled Lenggoro, 和田匡史, 野田直希, 牧野尚夫, 峰島知芳, W. W. Szymanski: 固定発生源におけるエアロゾルの生成と排出挙動, エアロゾル研究, Vol. 29, No. S1, 27-37 (2014)
- 17) 中塚大輔: ごみ焼却飛灰の粒径別特性, 京都大学大学院工学研究科修士論文 (1999)
- 18) R. R. Greenberg, G. E. Gordon, W. H. Zoller, R. B. Jacko, D. W. Neuendorf and K. J. Yost: Composition of Particles Emitted from the Nicosia Municipal Incinerator, Environmental Science & Technology, Vol. 12, No. 12, pp. 1329-1332 (1978)
- 19) 貴田晶子, 酒井伸一, 芝川重博, 松本暁洋: 一般廃棄物焼却炉のダイオキシン類対策に伴う重金属類の排出抑制効果に関する研究, 環境化学, Vol. 13, No. 1, pp. 51-67 (2003)
- 20) 環境省: 平成 25 年度微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) 二次生成粒子の挙動説明に関する文献調査  
<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/conf/conf140820.html> (2014. 1001 情報取得)